

## 多目标驱动的太湖调度水位研究\*

吴浩云<sup>1</sup>, 刘敏<sup>2\*\*</sup>, 金科<sup>1</sup>, 陈红<sup>1</sup>, 甘升伟<sup>1</sup>

(1: 水利部太湖流域管理局, 上海 200434)

(2: 太湖流域管理局水文局(信息中心), 上海 200434)

**摘要:** 太湖是流域洪水集散地、水资源调配中心,也是长三角水生态环境的晴雨表,其水位高低影响防洪、供水、水生态、水环境等系统功能,使得太湖面临统筹调度问题日益凸显。本文以太湖为主要研究对象,基于多年实测数据,采用数理统计、河网水动力模型计算,分析流域降雨、进出湖水量和水生态环境演变规律及其与太湖水位的互馈关系,综合考虑不同调度期流域防洪、供水、水生态、水环境目标及其承受风险的时空差异性,优化太湖调度水位,并在此基础上提出太湖调度功能区划图。结果表明,在设计洪水和供水条件下,通过调度水位调整,统筹调控流域水工程,前期预降太湖水位,后期抬升太湖水位,实现太湖多目标调度,可有效保障流域防洪、供水和航运安全,改善河湖生态环境,共绘美丽太湖。  
**关键词:** 调度水位;洪水;水资源;水生态;太湖

## Research on multi-objective driven dispatching water level of Lake Taihu\*

Wu Haoyun<sup>1</sup>, Liu Min<sup>2\*\*</sup>, Jin Ke<sup>1</sup>, Chen Hong<sup>1</sup> & Gan Shengwei<sup>1</sup>

(1: *Taihu Basin Authority of Ministry of Water Resources, Shanghai 200434, P.R.China*)

(2: *Bureau of Hydrology Information Center of Taihu Basin Authority, Shanghai 200434, P.R.China*)

**Abstract:** Lake Taihu is a center of flood distribution, water resources regulation, storage, and a barometer of the water ecological environment. Its water level affects the system functions of flood control, water supply, water ecology, water environment, shipping etc., which makes the overall dispatching problem of Lake Taihu increasingly prominent. In this paper, Lake Taihu is taken as the main research object. Based on the monitoring data, mathematical statistics and hydrodynamic model calculation were used to analyze the changes of rainfall, discharge of lake water, water ecological environment and their feedback relationship with the water level of Lake Taihu. Considering the objectives of flood control, water supply, water ecology, water environment and its spatial and temporal differences in risk tolerance during different dispatch intervals, the dispatching water level of Lake Taihu was optimized. On this basis, the dispatching function zoning map of Lake Taihu was proposed. The results showed that, under the conditions of design flood and water supply, the water level of Lake Taihu could be pre-reduced in the early stage and appropriately raised in the late stage through the adjustment of dispatching water level and the overall regulation of river basin water projects. It could effectively guarantee the safety of flood control, water supply and shipping in the basin, and effectively improve the ecological environment of rivers and lakes. It would be continuously improved in practice and exploration, so as to lay a stable foundation for the construction of beautiful Lake Taihu.

**Keywords:** Dispatching water level; flood; water resources; water ecology; Lake Taihu

太湖水位是衡量太湖水文水资源和水环境水生态的一项最重要的基本要素,其时空变化不仅受到气候、水文等自然要素的影响,与近年来日益增强的人类活动也密切相关<sup>[1-4]</sup>。太湖流域地处长江三角洲核心区域,地势低洼,河网密布,河湖水位受外江潮位和沿长江沿杭州湾工程调控影响。太湖位于流域中心,处于复杂的“江—河—湖—海”系统中,水情变化对流域防洪安全、水资源利用、水生态复苏和水环境改善产生

\* 2022-06-29 收稿;2022-08-22 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2017YFB0504105,2018YFC0407900)和水利部重大科技项目(SKR-2022042)联合资助。

\*\* 通信作者;E-mail: liumin@tba.gov.cn。

一系列影响<sup>[5-6]</sup>,按照“西敞东控”原则建设环湖大堤,以降水和长江作为主要补给水源的太湖,其水位波动具有明显的季节性和人为调控性<sup>[7-8]</sup>。多年来,很多学者针对太湖流域降雨时空变化特征<sup>[9-11]</sup>、驱动因子分析<sup>[1-2]</sup>、太湖分期特征<sup>[8,12-13]</sup>、流域水利工程控制运用<sup>[14-15]</sup>、太湖水环境水生态时空特征<sup>[16-17]</sup>等方面开展了广泛而深入的研究,取得了丰硕的成果。

前人研究成果充分表明,在气候变化和人类活动背景下,太湖水安全受众多因素影响,但目前针对太湖水位时空变化特征及其通过调控对保障以太湖为核心的流域防洪安全、供水安全和水生态环境安全的综合研究相对较少,多目标调度水位研究多集中在水库<sup>[18-20]</sup>。太湖调度不同于一般水库的调度,而又具有水库调度的基本模式<sup>[21]</sup>,程文辉等<sup>[22]</sup>以保证防洪安全为前提,研究太湖调度线,认为抬高太湖水位有利于太湖水质的改善,有利于水资源的充分合理使用;王银堂等<sup>[8]</sup>针对暴雨洪水演变规律、洪水资源利用评价、洪水调控模式以及风险效益评价等内容开展了系统研究,构建了平原河网地区洪水资源利用技术体系,取得了显著的经济、环境和社会综合效益;梅青<sup>[23]</sup>等总结了太湖流域防洪与水资源调度实践,分析了当前及今后一个时期流域调度工作面临的新形势,并对如何做好太湖流域调度工作进行了思考。

现行的太湖调度线是通过实践经验总结得出的结果,反映了流域经济社会的发展、工程体系的健全和调控能力的变化。面对太湖流域经济社会发展的新形势、新要求,以及水雨情条件的新变化,有必要从统筹防洪、供水、水生态、水环境的角度,开展太湖调度水位的优化研究。本文以太湖水水位为研究对象,基于详实资料,采用数理统计、河网水动力模型等研究太湖水情演变特征、太湖调度时段分期、水位分级、功能分区控制及其受控驱动因素,为流域多目标调度方案编制与水资源调度、太湖管理与保护提供科学依据。

## 1 研究区概况和数据来源

### 1.1 研究区概况

太湖流域地跨江苏、浙江、安徽和上海三省一市,流域面积 36895 km<sup>2</sup>,占国土面积的 0.39%。2021 年流域人口 6811 万,占全国 4.8%,国内生产总值 112736 亿元,占全国 9.8%,人均 GDP 是全国的 2.0 倍,是我国人口最集中、经济最发达、城镇化程度最高的地区之一。由于其特殊的地理位置,加上地势低洼,洪涝灾害频发;加上人口和经济增长迅速,水资源需求量增加,流域重要水源地尚存在水质风险及隐患,供水保障要求高;此外,太湖蓝藻水华频繁出现,保护生态环境任务繁重<sup>[1-2,8]</sup>。长江经济带、长三角一体化上升为国家战略后对流域水治理管理提出了新要求,亟需在总结流域近年治理和调度实践的基础上,根据新形势、新要求优化调整太湖调度水位线,强化流域多目标统筹协调调度,通过有效控制太湖水位,有序调配进出湖水量,保障流域防洪、供水、水生态、水环境安全。

### 1.2 资料和研究方法

本文所采用的数据主要来源于流域水利部门多年来组织开展的太湖水文、水资源、水生态、水环境监测数据。部分成果来源于太湖流域管理局实地调查报告、专题研究报告。

本次太湖水位数据系列为 1954—2020 年,为太湖湖区望亭(太)、大浦口、洞庭西山(三)、夹浦和小梅口 5 个水位站水位的算术平均值。降雨数据选取太湖流域 106 个雨量站计算流域及各分区的降雨量系列,面雨量系列为 1951—2020 年。台风资料在南京水利科学研究院编写的《太湖流域梅雨与台风遭遇可能性研究》报告的基础上延长到 2020 年。水质数据采用太湖流域管理局 2001—2020 年监测结果,洞庭西山水温数据采用苏州水文局 2001—2020 年监测成果,水生植物数据采用 2001—2020 年 5 月和 8 月 MODIS 卫片解析结果。太湖水生态指示指标较多,其中浮游植物中的蓝藻和高等水生植物中的沉水植物是目前影响太湖湖泊生态功能健康与否的两大关键指标。统计结果表明,太湖蓝藻水华与叶绿素 *a* 浓度具有极显著相关性。因此,本研究选取叶绿素 *a* 指标替代蓝藻水华情况。

本研究在总结太湖流域调度实践、梳理流域水工程及水文情势变化、水资源开发利用状况、水生态水环境现状的基础上,针对不同分析要求,采用河湖调查、机理分析模型、数理统计模型、水文水动力学模型计算<sup>[2,24-25]</sup>开展分析,探讨太湖调度水位的调整方案,并评估方案对流域防洪、供水、水生态、水环境影响。

本研究采用的太湖流域水文水动力模型由河海大学和太湖流域管理局共同研制,1990s 迄今一直应用于太湖流域防灾减灾和水利规划、设计与管理工作<sup>[26-27]</sup>。近年来经过改进和完善,根据最新的下垫面、河道

湖泊、水利工程资料进行细化,采用了流域历史及近期的多场降雨和相应水位资料进行率定,能够较可靠地模拟流域产汇流和河网汇流规律。太湖流域水文水动力模型分为降雨径流模块和水动力模块。降雨径流模块针对不同下垫面特征分别构建平原区、山丘区不同产汇流子模块。平原区按水面、水田、旱地、建设用地4类下垫面分别采用不同方法计算产流;山丘区采用新安江模型进行产汇流计算,同时考虑水库的调洪作用。降雨径流模块计算结果为水动力计算模块提供河道侧向入流和上游山区流量边界。水动力模块主要通过求解描述河道水流运动的圣维南方程组,得到全流域平原区河网节点水位、河道断面流量等结果。

## 2 结果与分析

### 2.1 太湖调度分期及其表征

太湖与江河湖海密切相连,在一个水文年,太湖水位变化过程大致经历3个阶段,即涨水期、丰水期和枯水期,一定水位以上可以满足流域供水安全、水生态环境的需要,否则需沿江诸闸泵投入运用引水。但太湖具有防洪、水资源配置、水生态复苏和水环境改善等特殊功能,其时段和水位调控更需精细,综合防洪、供水、水生态、水环境多种目标,基于太湖流域现状土地利用、水系分布、水利工程布局及调度方式,采用数理统计<sup>[28]</sup>等方法筛选主导因子,并进行风险评估<sup>[29-30]</sup>后,对全年进行时段划分。

为明确各调度期的自然主导因子,本文对太湖年最高水位、年最低水位、出入梅时间、热带气旋影响太湖流域的时间在各个月的发生频次进行了统计,其中出入梅时间、6—9月影响太湖流域的热带气旋的发生频次按旬进行统计。根据表1所示,6月中旬为主要入梅时段,7月中下旬为主要出梅时段,同时年最高水位发生在7月份的频次最高,该时段防洪风险高,要防范梅雨带来高水位的风险;出梅后至10月底为主要台风影响时段,同时该时段为用水高峰时段,在防范台风带来的洪水风险的同时,需要兼顾雨洪资源利用,以防范极端干旱年该时段出现低水位无法满足用水需求的危险。5月中旬到6月上旬及10月份叶绿素a浓度高,需要防范蓝藻水华大面积暴发导致水生态破坏影响水源地供水安全的风险。沉水植物根据生长周期分为不同时段,其中3—4月萌发期对水位最为敏感,相对较低的水位能带来更多的光照,促进沉水植物生长恢复,因此该时段调度主要关注生态需求。

表1 太湖流域水文年影响太湖调度的主导因子  
Tab.1 Dominant factors affecting hydrological year dispatching in Taihu Basin

分类	太湖水安全风险程度(红色:高风险期;橙色:中风险期;蓝色:低风险期)																			
年最高水位频次	0	0	2	6	23	9	10	11	2	1	3	0								
入梅频次	0	0	0	1	15	32	15	1	1	1	0	0	0	0	0					
出梅频次	0	0	0	0	1	10	25	22	6	0	0	0	0	0	0					
台风频次	0	1	3	5	8	13	12	14	25	34	27	25	14	22	15	13	1	0	0	0
年最低水位频次	11	7	5	6	1	3	1	1	1	0	12	6	14							
用水状况	正常				高峰				正常											
叶绿素a浓度	低		中		高		中		高		中		低							
沉水植物生活史	萌发期		幼苗期		生长期		成熟期		种子扩散期		越冬期									
时段划分	汛前期		前汛期		主汛期		台风影响期		枯水期											
月份	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2								

各时段划分如下:3—4月易发桃花汛,太湖水位开始上涨,用水相对平缓,但此时万物复苏,是太湖沉水植物萌发期,相对较低的水位能给太湖湖底带来更多光照,有助于沉水植物生长恢复,属于生态敏感期,定义此段为汛前期。5—6月中旬太湖水位继续上涨,流域用水逐渐增多,沉水植物由幼苗向生长期过渡,太湖水温渐升,蓝藻叶绿素明显增加,将进入主汛期,定义此段为前汛期。6月15日—7月20日梅雨季,流域用水增多,沉水植物处于生长期,正常降雨可满足流域用水需求,但流域性洪水多发生在此段时间,如1954、1991、1999、2016和2020年流域性大洪水或特大洪水<sup>[31-34]</sup>,定义此段为主汛期。7月21日—10月底台风多发,其中从7月19日—8月28日(40d)台风影响的可能性最大,占台风影响总数的47.1%(约一半)<sup>[8]</sup>,同时,流域气温偏高,处于用水高峰,如遇严重干旱年,太湖会出现年最低水位,太湖沉水植物由生长转向成

熟,定义此段为台风影响期;11月至次年2月底,流域用水减少,沉水植物越冬,太湖水位缓降,年最低水位主要出现在该段时间,定义此段为枯水期。

## 2.2 太湖调度水位及其分级控制目标

统筹流域防洪、供水、水生态和水环境等需求,太湖多目标调度水位主要由排水调度线和引水调度线组成。

排水调度线主要基于流域防洪安全考虑,统筹供水、水生态、水环境需求。流域防洪原以1954年流域平均最大90 d降雨量约相当于50 a一遇作为设计标准。太湖5月1日起涨水位3.10 m,设计洪水位4.65 m。太湖流域综合治理实施过程中,出现了对流域防洪更为不利的1991年和1999年成灾雨型,2008年国务院批复的《太湖流域防洪规划》确定了流域不同降雨典型50 a一遇“91北部”“99南部”的设计降雨洪水,太湖调洪计算按照6月15日起调水位3.10 m,7月20日台风影响期起始控制水位3.50 m进行全流域水动力模型<sup>[24]</sup>调洪计算,确定太湖规划设计洪水位4.80 m,并据此推动新一轮太湖综合治理和水利工程建设,基本形成流域防洪和水资源调控体系。

研究表明,为保障流域防洪安全,主汛期起调水位仍为3.10 m,并从5月1日入汛开始就定为调度目标值。7月20日进入台风影响期,为适当利用流域洪水资源<sup>[8]</sup>,保障太湖周边及下游重要城市安全,太湖水位尽量不超4.20 m,基于1949年以来影响流域252场台风统计分析,取50 a一遇台风降雨增水约0.60 m,设定太湖台风影响期排水水位3.60 m。前后为保障水源地供水安全、满足流域水资源配置需求,兼顾河湖水生态改善需求,与流域设计供水上包线衔接,即11—12月将太湖排水调度水位设定为3.60~3.30 m直线递减,1—2月将太湖排水调度水位定为3.30 m,3—4月太湖排水调度水位逐步下降,与3.10 m衔接。

引水调度线主要考虑保障流域供水安全及水生态环境改善需求。流域水源地格局调整后,对保障最低旬平均水位2.80 m目标提出了更高要求<sup>[35]</sup>,基于现有工程体系、太湖进出水量变化特征、沉水植物生长过程,选择降水频率与75%降水保证率接近或略枯的典型年(2004年、2013年),以及1986年有入湖实测资料以来的系列中,降雨保证率低于75%的年份开展逐年型逆时序调节计算,取各方案的下包线,其中太湖河道外用水量采用现状实际用水量,河道内用水量参照《太湖流域水量分配方案》中2020水平年水资源调度期太湖分配水量(79.3亿m<sup>3</sup>)和2007—2020年汛期和非汛期实测出湖比例分配。

综上所述,排水调度水位线:5—10月主要考虑以防洪需求为主,11月至次年4月主要考虑水生态环境、供水需求。引水调度水位线:与排水调度水位线相协调,5—10月主要考虑保障供水需求,兼顾水生态环境需求,11月至次年4月主要考虑保障水生态、供水安全需求。太湖调度水位线见图1。

## 2.3 太湖调度区划及其目标识别

结合太湖流域防洪、供水、水环境、水生态“四水”安全和调度实践,通过研究,解决太湖目标调度区2个关键问题。第1个关键问题,研究认为水位对流域水安全形势具有指示性作用,是作为目标区划的基本判别标准,当水位显著高于或低于相应时期的调度线,才能认为进入了相应的目标调度区;第2个关键问题,研究确定目标调度开始、基本结束的具体条件。太湖水位依然是指示性因素,主要根据太湖水位超过或低于同期调度水位的开始或结束时间的关系,或者跨过调度分期的时间关系进行判断。

结合前人研究<sup>[21,36]</sup>,本研究在确定前文排水调度线和引水调度线的基础上,明确太湖特征水位如下:2.65 m为最低生态水位,即太湖生态环境系统可以恢复的极限低水位;2.80 m为供水保证水位,或旱限水位,即低于该水位需启动抗旱应急响应,流域可能出现缺水;3.80 m为太湖警戒水位,超过该水位太湖发生编号洪水;4.65 m为设计洪水位,超过该水位太湖发生超标准洪水;4.80 m为规划设计洪水位。2条调度水位线和4条特征水位线及5个调度时段将太湖调度划分为3大板块10个分区(图1)。

第一板块排水区,主要体现太湖作为流域洪水集散地的功能,处于排水线以上共5区;超过4.65 m的区域为超标准洪水排水区;超过3.80 m低于4.65 m的区域为标准内洪水排水区;高于排水调度水位至3.80 m的区域因各时段功能主导需求不同划分为不同的调度区域,具体如下:

5—10月:防洪风险高,定义为降低防洪风险排水区;

11月至次年2月:该时段流域降水总体较少,太湖水位以下降为主,防洪风险低。排水调度思路为充分利用太湖有效库容调蓄,促进河湖水体流动,还原水位自然消落过程,满足流域水生态、水环境改善的自然

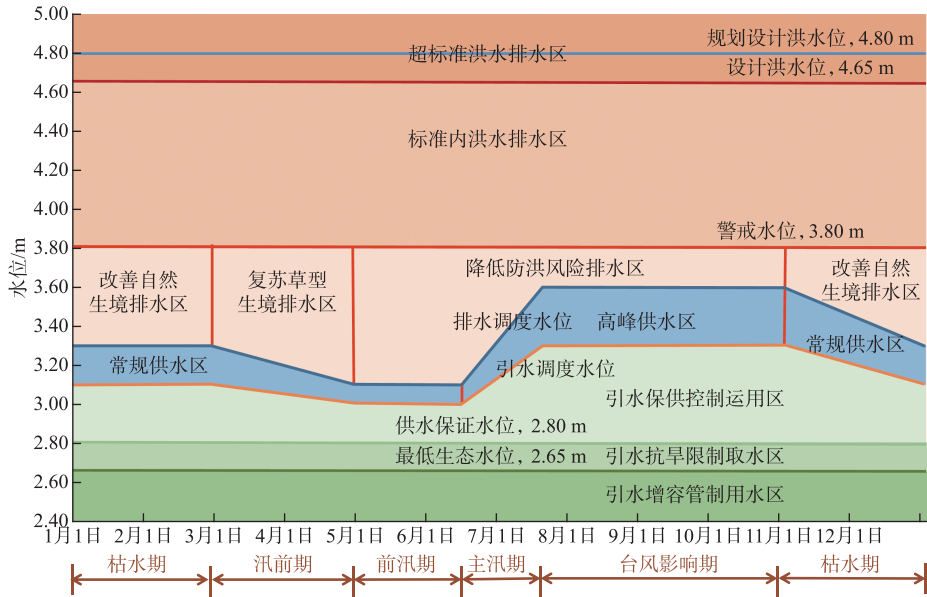


图 1 太湖调度水位线和调度区划

Fig.1 Dispatching water level line and dispatching function zoning map of Lake Taihu

需求,将该区域定义为改善自然生境排水区;

3—4月:该时段是沉水植物萌发期,相对较低的水位能带来更多的光照,有助于沉水植物生长。排水调度思路为降低水位促进沉水植物生长恢复,以利于太湖从藻型生境向草型生境的良性转变,将该区域定义为复苏草型生境排水区。

第二板块供水区,主要体现太湖作为流域重要水源地的功能,处于排水线和引水线之间,共2区:根据不同时期供水需求不同,分为6—10月高峰供水区和其他时段常规供水区。

第三板块引水区,主要体现太湖作为流域水资源调配中心功能,处于引水调度线以下,共3区:低于引水调度线高于2.80 m的区域定义为引水保供控制运用区,实施“引江济太”调水,增加流域水资源补给,保证河道外合理用水需求,环太湖口门实施控制运用;低于2.80 m高于2.65 m的区域定义为引水抗旱限制取水区,加大流域引水力度,增加入太湖水量,保证生活及工业用水,适当削减农业用水,加强环太湖口门的控制运用;低于2.65 m的区域定义为引水增容管制用水区,全力引江水入太湖流域,提高引水入太湖效率,保障基本生活用水需求,严格限制工业和农业用水,必要时关闭环太湖口门,降低对太湖生态环境系统的可能破坏。

### 3 讨论

以太湖水为表征的多目标调度受到气候水文变化<sup>[12]</sup>、经济社会发展<sup>[14]</sup>、工程调控能力<sup>[23]</sup>、水生态环境等因素影响<sup>[37-39]</sup>。太湖作为太湖流域洪水与水资源调蓄和调度的中枢,在多目标驱动下,其水位不仅是流域性暴雨洪水影响、工程运用的直接反映,也是太湖流域水安全状况的最重要表征。

#### 3.1 太湖流域不断完善的水利工程体系和非工程体系是实现太湖多目标调度的基本驱动力

1991年大水之后,按照《太湖流域综合治理总体规划方案》,太湖流域望虞河、太浦河、环湖大堤、杭嘉湖南排工程等一批治太骨干工程先后建成,流域基本达到了防御1954年雨型的50 a一遇洪水标准<sup>[32]</sup>。2007年以来,根据国务院批复的《太湖流域水环境综合治理总体方案》《太湖流域防洪规划》等流域规划,新孟河、新沟河、环太湖后续工程等一批骨干水利工程先后实施,流域防洪和水资源调控工程体系进一步完善<sup>[8,40]</sup>。依托智慧太湖等建设,太湖流域已建立或完善了水文遥测系统、洪水预报调度系统、水资源实

时监测系统、太湖流域河网水动力学模型等,并在流域防洪及水资源调度中得到实际应用和完善<sup>[2,8]</sup>。流域工程和非工程调控体系的建成为太湖实施多目标调度奠定了坚实的基础。

进入新时期,在气候变化与长三角一体化发展背景下,流域下垫面条件已发生重大变化,太湖流域的水问题已经由单一的洪旱转变为水旱灾害防治、水资源配置、水环境治理、水生态修复、水应急管理交织并存的综合性水安全问题,水事关系复杂,治理与管护难度高。在进行太湖流域治理时,客观上要求将流域的防洪减灾与水资源利用、水生态修复、水环境改善等需求统筹考虑,优化调度水位,健全调度机制,实现多目标调度,保障太湖安澜,服务长三角一体化发展国家战略实施。

### 3.2 太湖流域“四水”安全统筹保障需求是实施太湖多目标调度的内生驱动力

太湖流域降雨的季节性变化特征十分明显,年内降水主要集中在6—7月梅雨期和8—9月台风期,见图2。平均入梅时间为6月15日,平均出梅时间为7月9日,流域性大洪水的出梅时间基本在7月20日左右<sup>[8,12]</sup>。影响太湖流域的台风70%集中在7月下旬—9月下旬,近10年10月影响太湖流域的台风由7年1次增加至2年1次。非汛期降水相对集中在3—4月,11月至次年2月降雨偏少。

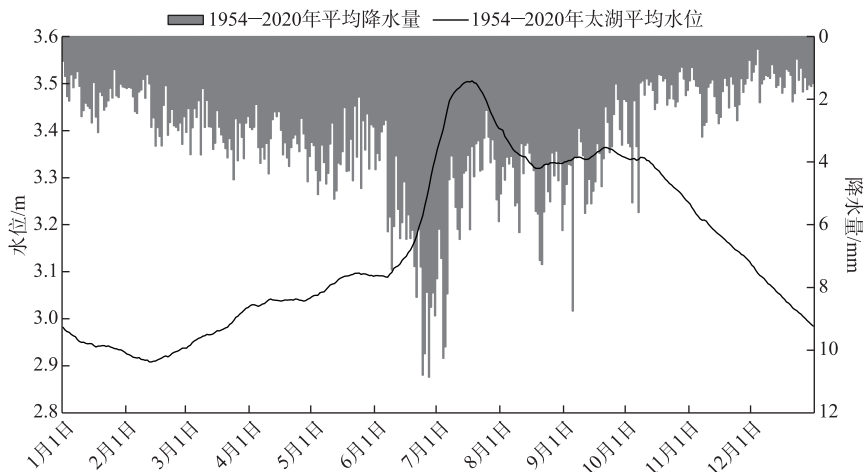


图2 太湖流域降雨—太湖水位响应过程

Fig.2 Rainfall-water level response process in Taihu Basin

太湖水位年高低变化与流域降雨多少变化相似,略滞后于5~10 d。年最高水位呈现两个明显峰值,第一个峰值出现在6月下旬至7月下旬,第二个峰值出现在8月中旬至10月中旬,其中,第一个峰值明显高于第二个峰值,说明梅雨是造成太湖年最高水位的主要因素。从图3可知,最大15 d降雨310 mm左右、最大30 d降雨480 mm左右,太湖水位就可以到达4.80 m左右,由此可知,随着气候变化和下垫面变化,流域最大15~30 d降雨已成为造成太湖高水位的最主要动因。太湖面临暴雨洪水响应更快,防洪压力更大的挑战,太湖多目标统筹调度不仅在水位高低还需要在时间尺度予以充分考虑。

与此同时,太湖流域地处南方丰水地区,多年平均本地水资源总量为188.2亿 $m^3$ ,但由于人口众多、经济发展水平较高,人均本地水资源占有量仅为全国平均水平的1/5。近10年流域年均用水量344.5亿 $m^3$ ,长江供水已由2007年的147.4亿 $m^3$ 增加到2021年的210.9亿 $m^3$ ,水资源时空分布不均,与生产力布局不匹配,迫切需要对水资源进行再次调配(图4)。太湖作为流域最重要的供水水源地之一,河道外取水量总体呈逐年增长趋势,目前水源地主要分布在无锡南泉至苏州七都一线以东沿湖地区,直接从太湖取水的规模已达到620万 $t/d$ ,2021年取水量较2007年净增4.7亿 $m^3$ ,增幅达到44%,未来随着嘉兴、上海水源地的调整,还有进一步增长的需求。环太湖地区对发挥太湖调蓄、利用洪水资源、保障供水安全的要求明显提高。

随着2007年以来年均入太湖水量较1986—2006年增加30.2亿 $m^3$ ,其中以湖西区入湖水量增加最为显著<sup>[37,41]</sup>,太湖平均水位也逐年上升<sup>[31]</sup>,见图5,近10年达3.34 m左右。太湖水位抬高增加了流域水资源和水环境承载能力,但更需要从时间尺度和太湖水资源二次配置角度统筹流域与区域、防洪和供水、资源与环



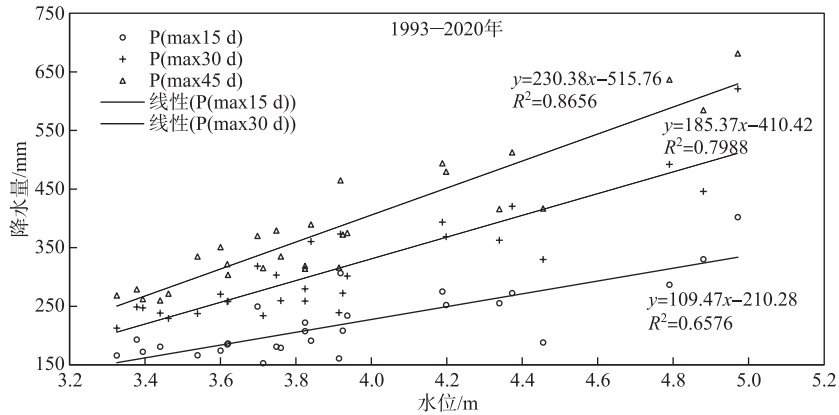


图3 太湖流域时段极值降雨和太湖年最高水位关系

Fig.3 Relationship between extreme rainfall and annual maximum water level in Taihu Basin

境等目标优化,努力使防洪风险尽量小而太湖水资源效益利用最大,同时有利于水生态环境复苏。基于此,多年来在各方共同努力下,实施流域综合调度,连续14年实现“两个确保”(即确保饮用水安全、确保不发生大面积水质黑臭)目标。太浦闸调度也从原来的防洪调度为主转为防洪、供水、水生态、水环境综合调度,太浦闸常年开启并辅以泵站,保持河湖连续<sup>[41]</sup>。

### 3.3 太湖水的承载空间拓展是丰富太湖多目标调度的直接驱动力

水资源是经济社会发展的基础性、先导性、控制性要素,水的承载空间决定了经济社会的发展空间。习总书记指出“保护生态环境就是保护生产力,改善生态环境就是发展生产力。”自然资源的总量和生态环境的承载力是有限的,如不进行协调、规范和约束,就会超过生态阈值,打破生态平衡,引起生态危机,迫切需要基于自然河湖的水文周期内明显的丰枯变化,优化水利工程的调控方式,尽可能恢复生境的空间异质性和河湖生物脉冲式周期韵律,改善生物的栖息地水环境质量,复苏水生态系统,是新阶段太湖多目标调度面临的重大战略问题。

目前,太湖最为突出的水生态问题为高强度蓝藻水华和水生植物分布面积减少<sup>[4,17]</sup>。太湖蓝藻密度受湖体氮磷营养盐、水温和光照等气象因素影响较大,往往在初夏初秋季节出现峰值(图6)。太湖蓝藻密度和叶绿素a浓度与水温呈极显著正相关,而与水位无显著相关( $P > 0.05$ ),高水位并不会降低太湖蓝藻水华强度<sup>[1,37-38]</sup>,但控制湖西等地区劣质水入湖水量,适当抬高汛后期太湖水位,加大望虞河“引江济太”力度,有利于减少入湖污染物负荷,降低太湖总磷浓度的波动,减轻太湖蓝藻水华发生<sup>[6,39,42]</sup>。适度的调水引流改善水动力条件可以有效缓解蓝藻水华强度<sup>[34,43]</sup>,如2013年8—9月、2017年5月引水期贡湖水域蓝

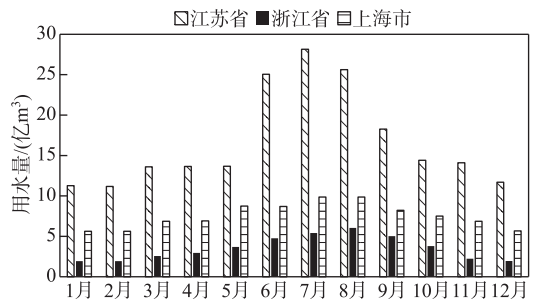


图4 2020年太湖流域各省市用水量

Fig.4 Water consumption of provinces and cities in Taihu Basin in 2020

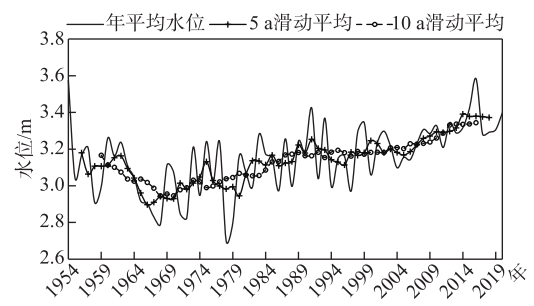


图5 太湖年平均水位变化趋势

Fig.5 Variation trend of mean annual water level in Lake Taihu

藻密度明显小于非引水期, 2020年5-6月引水期贡湖锡东水厂取水口附近水域蓝藻密度均值为  $11202 \times 10^4$  cells/L, 明显小于引水期前一周蓝藻密度均值  $26861 \times 10^4$  cells/L。

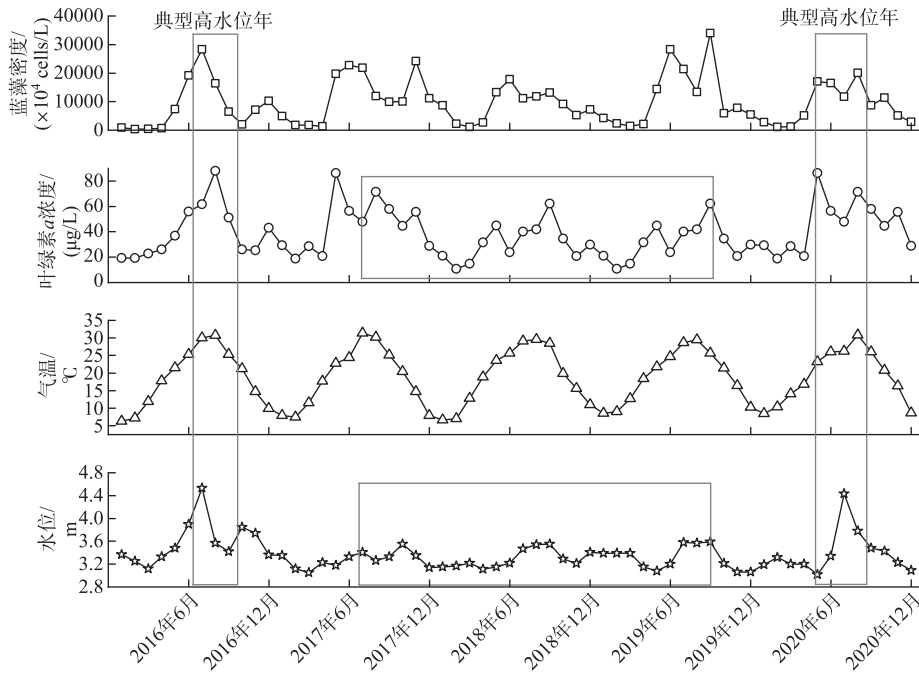


图 6 2016—2020 年太湖蓝藻密度、叶绿素 *a*、气温、水位变化

Fig.6 Variation of cyanobacteria density, chlorophyll-*a*, air temperature and water level in Lake Taihu from 2016 to 2020

不少学者持续以水位变动与水生生物关系为对象开展研究<sup>[15,44-45]</sup>。沉水植物是太湖主要的生物类群, 沉水植物与太湖水生态环境相互作用, 其生长发育、种群结构对维持太湖水生态系统的稳定具有重要意义。据调查统计, 2015—2020 年沉水植物分布面积约为  $120 \text{ km}^2$ , 相应 3—4 月太湖水位约为  $3.20 \text{ m}$ , 明显低于 2001—2014 年分布面积均值  $263 \text{ km}^2$ , 其相应 3—4 月太湖水位约为  $3.05 \text{ m}$  (图 7)。2010 年 3—4 月太湖水位偏高, 月均水位为  $3.50 \text{ m}$ , 当年 5 月沉水植物分布面积仅  $116.1 \text{ km}^2$ 。2011 年春季干旱少雨, 3—4 月太湖水位降至  $2.83 \text{ m}$ , 沉水植物迅速恢复, 分布面积达到  $287.1 \text{ km}^2$ , 对太湖水生态系统起到修复作用。因此, 3—4 月是影响太湖沉水植物分布面积的敏感时段和关键时段, 适度降低 3—4 月太湖水位, 有望促进部分湖区沉水植物恢复和生态环境复苏, 实现统筹调度和高水平水安全的良性互动。

### 3.4 保障水安全和长期调度实践是太湖多目标调度的主要社会驱动力

太湖调度目标的变化综合反映了流域经济社会发展程度、治理管理进度、水情变化强度、技术应用深度等之间的相互关系。在不同时代由于流域防洪保障和水资源需求不同, 不同的阶段其主体调度目标不同, 太湖调度控制水位也有所不同<sup>[11-12,23]</sup>。2000 年之前, 流域主要围绕防洪安全开展调度, 结合区域经济社会发展和治太骨干工程建设, 不断探索分级调度、分期调度, 逐步规范有序, 形成 1999 年国家防总批复的《太湖流域洪水调度方案》; 进入 21 世纪, 随着流域经济社会发展, 流域水资源、水生态环境与经济社会发展的矛盾日益突出, 太湖流域调度开始向蓄泄兼筹、引排结合转变, 强化雨洪资源利用, 开展“引江济太”调水试验<sup>[12,46-47]</sup>, 实践表明, 适当优化调控水位有利于洪水资源利用和水生态环境改善。经过多年探索流域洪水、水资源、水生态环境综合调度, 相继形成 2009 年水利部批复的《太湖流域引江济太调度方案》和 2011 年国家防总批复的我国第一个流域性综合调度方案《太湖流域洪水与水量调度方案》。2011 年以来相继开展了 50 余次洪水调度和近 30 次“引江济太”调度, 见图 8 和图 9, 通过调度实践, 不断完善调度规程, 建立调度机



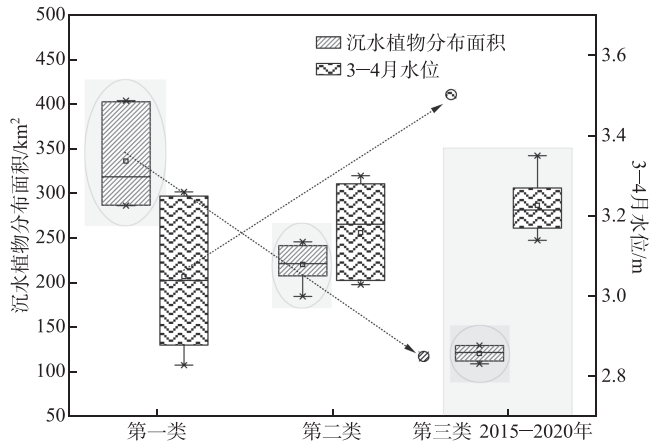


图 7 太湖 3—4 月水位与沉水植物分布面积的关系

Fig.7 Relationship between water level and distribution area of submerged plants in Lake Taihu from March to April

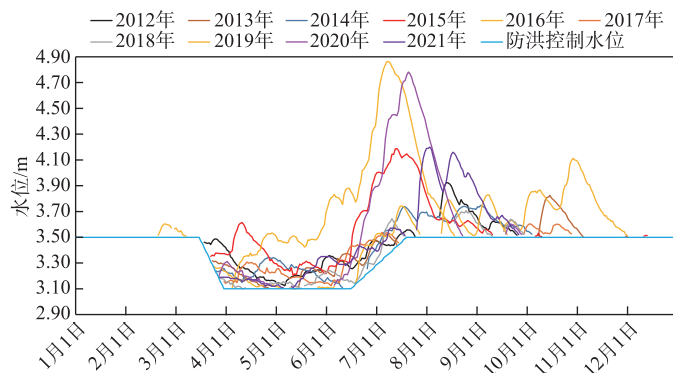


图 8 近 10 年太湖流域洪水调度太湖水位线

Fig.8 Lake Taihu water level line of flood dispatch in recent 10 years

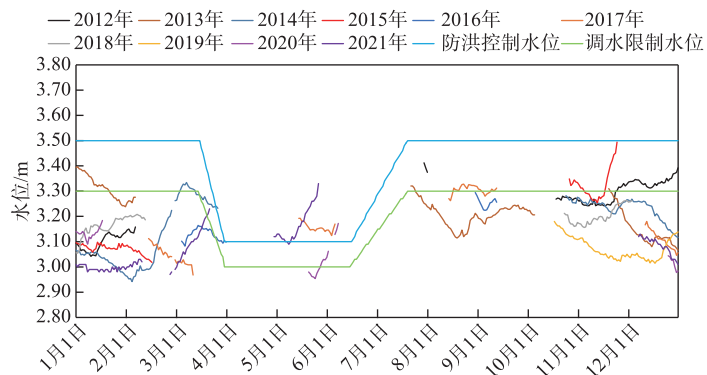


图 9 近 10 年引江济太调度太湖水位线

Fig.9 Lake Taihu water level line of Yangtze-Taihu water diversion dispatch in recent 10 years

制,成功防御了 2016 年流域性特大洪水、2020 年流域性大洪水以及 2013 年“菲特”、2021 年“烟花”等多个

强台风的严重影响,抗御了2011年、2013年、2022年太湖流域严重气象干旱,应对了数次太湖蓝藻水华暴发等水体异常事件,在保障流域防洪和供水安全、促进水生态环境改善等方面发挥了重要作用<sup>[8,40,48]</sup>。

随着我国进入新发展阶段,“十六字”治水思路和长江经济带、长三角一体化国家战略等对探索中国式流域水治理现代化提出新的更高要求,要发挥太湖在防御流域水灾害、保障水资源、复苏水生态、改善水环境等方面综合作用,亟需总结流域调度实践,根据新形势、新需求优化太湖调度水位线,实现多目标统筹协调,做到涉水效益“帕累托”最优,更大程度发挥水利工程的综合效益<sup>[49]</sup>。

### 3.5 太湖多目标调度水位风险与管控

太湖水位优化调整是太湖流域多目标统筹协调调度的关键技术,由其引起的流域防洪、水资源、水生态、水环境的效益和风险并存。基于流域水量水质模型,对设计洪水、设计枯水等进行多方案计算分析结果表明,通过优化太湖调度水位,太湖及河网重要节点水位有高低,重要断面进出水量有多有少,重要站点水生态环境指标总体好转,经复盘计算,水安全风险总体与现行调度方案接近,但后期抬高太湖水位10 cm可以增蓄2.38亿m<sup>3</sup>资源,减少汛期弃水,保障枯水期供水,改善太湖及河网水生态环境,满足生态流量和航运水深保障要求。

受诸多不确定因素影响,提高流域水安全调度要素预测预警能力始终是重大科技问题之一<sup>[2,7]</sup>。为规避太湖多目标统筹调度带来的风险,流域水安全调控策略既要针对水安全致灾因子(极端气候、水灾害指标)的危险性,推行适宜的调控性策略,也要针对承灾体(人身安全、各类物种非物质资源)的脆弱性,推行必要的适应性策略,还要针对孕灾环境的不确定性,推行使经济社会更具承受灾害不利影响、快速恢复重建的强韧性策略。研究表明<sup>[4]</sup>,城镇化快速发展又河网密布的太湖流域不仅防洪排涝,而且水资源配置、水生态修复、水环境治理和航道安全等,对水利工程体系都有着极大的依赖性,也存在着相互间的利害冲突。工程体系的设计、建设和运维不仅需要具有调控性,而且更需要重视适应性、强韧性策略实施,要高度重视现代社会的正常运转越来越依赖于各类基础设施与生命线系统,实现从减轻灾害损失向减轻灾害风险转变。同样,即使远期规划目标完全实现,实际太湖及河网水位水质受自然和人为因素的影响更敏感,太湖流域未来多目标调度残余风险会依然呈增长的态势,一些难以受高标准工程措施保护和修复的区域,将承受更多的转移风险,就需要针对承灾体的脆弱性采取适应性策略和强韧性策略,包括水安全风险区划、风险分担与损失补偿等,使得承灾体本身对水安全具有更强的适应能力与防范能力,尽可能减轻水灾害损失及其不利影响<sup>[50-51]</sup>。如水安全风险区划不能仅以历史水灾记录为依据,而需要利用现代化的监测、模拟与情景分析等手段,对水安全风险构成要素的变化进行识别,以增强水安全风险区划和规划的实用价值。再如,从水生态的角度,随着长三角一体化发展示范区建成,环湖地区及下游水环境改善和生态保护需求将增加,以太湖为水源的用水保障和生态复苏要求会进一步提高,需要考虑山水林田湖草系统中最脆弱的水生态系统的修复,适当降低生态敏感期河湖水位,科学推进太湖生态湿地圈、水源涵养区建设,加快推进望虞河、新孟河、太浦河清水绿道的生态保护修复,改善流域河湖水动力,积极构建流域生态安全格局,有效维护流域河湖健康生命。

为有效实施太湖多目标调度,应完整准确全面贯彻新发展理念,以提升水安全保障能力为主线,以创新融合为核心,以统筹协调为亮点,以数字孪生太湖为驱动,建立落实与长三角一体化高质量发展相匹配的流域水安全保障体系,着力发挥其“防控流域水旱灾害、优化水资源时空分配、保障群众饮水安全、复苏河湖生态环境、畅通省市航运循环”的综合作用。

## 4 结论

太湖流域是典型的平原河网地区,随着气候变化、经济社会发展以及流域防洪工程体系的不断完善和水资源综合管理的逐步推进,客观上要求加强流域治理管理,统筹流域防洪减灾、水资源利用、水生态复苏、水环境改善多目标需求,推动流域统一规划、统一治理、统一调度和统一管理。

1) 近30年太湖流域经济社会和水文、水资源、水生态环境状况发生了一定变化,必须优化太湖调度线,统筹防洪、供水、水生态环境的需求,通过多目标统筹协调调度,保障流域水安全,促进人水和谐,增加民生福祉。

2) 随着长三角一体化高质量发展以及环湖地区和下游水环境改善和生态保护需求的增加,以太湖为水源的用水保障和生态复苏要求将进一步提高。研究表明,适当降低3—4月太湖水位,促进沉水植物修复;控制5—6月太湖水位,增加主汛期太湖有效调蓄能力;适当抬高7—10月水位,保障流域供水安全;缓慢降低11月至年底太湖水位,改善环太湖河湖水动力,这有利于维护太湖流域河湖健康全生命周期安全。

3) 太湖水位调控是流域治理管理的“牛鼻子”,其优化调整是一项系统工程,涉及到流域规划、治理、调度和管理,更涉及到流域上下游左右岸,要提升流域综合风险效益实时评估能力,做好多目标调度统筹协调。目前,防洪和供水研究对象主要以水位为核心、水生态研究对象限于沉水植物等,尚需在水安全和生态系统层次上的持续深入观测和综合研究,加强变化环境下太湖水位与流域山水林田湖草生态系统互馈关系的研究。在实际调度中应进一步细化调度规程,加强原型观测、做好监测预测、深化预演复盘、完善调度预案,如梅雨后期流域明显高温少雨时,台汛期水位可适当抬高,及时评估调度成效,持续优化水位,提高调控水平。

致谢:在论文成文过程中,感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所秦伯强研究员、河海大学钟平安教授、南京水利科学研究院王银堂教授级高级工程师的指导帮助;同时,感谢林荷娟、章杭惠、刘克强、李琛、吴东浩、吴亚男、甘月云等在数据采集分析、野外观测实验、文字修改完善等方面给予的大力支持。

## 5 参考文献

- [1] Wu HY, Jia GH, Xu B *et al.* Analysis of variation and driving factors of total phosphorus in Lake Taihu, 1980–2020. *J Lake Sci*, 2021, **33**(4): 974-991. DOI: 10.18307/2021.0402. [吴浩云, 贾更华, 徐彬等. 1980年以来太湖总磷变化特征及其驱动因子分析. 湖泊科学, 2021, **33**(4): 974-991.]
- [2] 程晓陶, 吴浩云. 洪水风险情景分析方法与实践: 以太湖流域为例. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.
- [3] Wang J, Xu YP, Wang YF *et al.* Impacts of anthropogenic activity on the response of water level to rainfall in the urbanized plain river network: A case study in the Hangzhou-Jiaxing-Huzhou region of Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2019, **31**(3): 779-787. DOI: 10.18307/2019.0316. [王杰, 许有鹏, 王跃峰等. 平原河网地区人类活动对降雨-水位关系的影响——以太湖流域杭嘉湖地区为例. 湖泊科学, 2019, **31**(3): 779-787.]
- [4] Zhao K, Zhou YF, Jiang ZL *et al.* Changes of aquatic vegetation in Lake Taihu since 1960s. *J Lake Sci*, 2017, **29**(2): 351-362. DOI: 10.18307/2017.0211. [赵凯, 周彦锋, 蒋兆林等. 1960年以来太湖水生植被演变. 湖泊科学, 2017, **29**(2): 351-362.]
- [5] Li HP, Yang GS, Jin Y. Simulation of hydrological response of land use change in Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2007, **19**(5): 537-543. DOI: 10.18307/2007.0507. [李恒鹏, 杨桂山, 金洋. 太湖流域土地利用变化的水文响应模拟. 湖泊科学, 2007, **19**(5): 537-543.]
- [6] Zhu W, Cheng L, Xue ZP *et al.* Changes of water exchange cycle in Lake Taihu (1986–2018) and its effect on the spatial pattern of water quality. *J Lake Sci*, 2021, **33**(4): 1087-1099. DOI: 10.18307/2021.0411. [朱伟, 程林, 薛宗璞等. 太湖水体交换周期变化(1986–2018年)及对水质空间格局的影响. 湖泊科学, 2021, **33**(4): 1087-1099.]
- [7] Wu HY, Wang YT, Hu QF *et al.* Flood identification and constraints analysis for flood resources utilization in Taihu Lake Basin. *Hydro-Science and Engineering*, 2016, (5): 1-8. [吴浩云, 王银堂, 胡庆芳等. 太湖流域洪水识别与洪水资源利用约束分析. 水利水运工程学报, 2016, (5): 1-8.]
- [8] 王银堂, 吴浩云, 胡庆芳等. 太湖流域洪水资源利用理论与实践. 北京: 科学出版社, 2015.
- [9] Wu HY, Wang YT, Hu QF *et al.* Tempo-spatial change of precipitation in Taihu Lake basin during recent 61 years. *Journal of China Hydrology*, 2013, **33**(2): 75-81. [吴浩云, 王银堂, 胡庆芳等. 太湖流域61年来降水时空演变规律分析. 水文, 2013, **33**(2): 75-81.]
- [10] Xu Q, Ye M, Cai J *et al.* Analysis of precipitation statistical characteristics and diagnosis of evolution trend in Taihu Lake Basin in recent 63 years. *Water Resources Protection*, 2022: 1-14. [许钦, 叶鸣, 蔡晶等. 近63a太湖流域降水统计特征分析及演变趋势诊断. 水资源保护, 2022: 1-14.]
- [11] Luo Y, Dong ZC, Guan XK *et al.* Flood risk analysis in the Taihu Basin during flood periods based on Copula function. *J Lake Sci*, 2020, **32**(1): 223-235. DOI: 10.18307/2020.0121. [罗赞, 董增川, 管西柯等. 基于Copula函数的太湖流域汛期洪涝灾害危险性分析. 湖泊科学, 2020, **32**(1): 223-235.]
- [12] Wu J, Liang P, Lin HJ *et al.* Meiyu determination and causes of typical abnormal Meiyu years in Taihu Basin? *J Lake Sci*, 2021, **33**(1): 255-265. DOI: 10.18307/2021.0118. [吴娟, 梁萍, 林荷娟等. 太湖流域梅雨的划分及其典型年异常成因分析. 湖泊科学, 2021, **33**(1): 255-265.]
- [13] Wang H, Chen HX, Xu ZA *et al.* Variation trend of total phosphorus and its controlling factors in Lake Taihu, 2010–2017. *J Lake Sci*, 2019, **31**(4): 919-929. DOI: 10.18307/2019.0421. [王华, 陈华鑫, 徐兆安等. 2010–2017年太湖总磷浓度变化趋势分析及成因探

- 讨. 湖泊科学, 2019, **31**(4): 919-929.]
- [14] Wu HY, Sun HT. Formulation and understanding of flood and water regulation scheme in Taihu Lake Basin. *China Flood & Drought Management*, 2012, **22**(2): 5-7. [吴浩云, 孙海涛. 太湖流域洪水与水量调度方案的制定和认识. 中国防汛抗旱, 2012, **22**(2): 5-7.]
- [15] Liu Y, Guo HC, Zhou F *et al.* Role of water level fluctuation on aquatic vegetation in lakes. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(9): 3117-3126. [刘永, 郭怀成, 周丰等. 湖泊水位变动对水生植被的影响机理及其调控方法. 生态学报, 2006, **26**(9): 3117-3126.]
- [16] Zhu GW, Xu H, Zhu MY *et al.* Changing characteristics and driving factors of trophic state of lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River in the past 30 years. *J Lake Sci*, 2019, **31**(6): 1510-1524. DOI: 10.18307/2019.0622. [朱广伟, 许海, 朱梦圆等. 三十年来长江中下游湖泊富营养化状况变迁及其影响因素. 湖泊科学, 2019, **31**(6): 1510-1524.]
- [17] Zhang XQ, Chen QW. Spatial-temporal characteristic of water quality in Lake Taihu and its relationship with algal bloom. *J Lake Sci*, 2011, **23**(3): 339-347. [张晓晴, 陈求稳. 太湖水质时空特性及其与蓝藻水华的关系. 湖泊科学, 2011, **23**(3): 339-347.]
- [18] Zhou JZ, Liu ZM, Lou SJ *et al.* A method for determining and dynamic controlling the limit water level of lakes by classification and stages. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, **53**(2): 127-138. [周建中, 刘志明, 娄思静等. 一种湖泊分级分期旱限水位确定与动态控制方法. 水利学报, 2022, **53**(2): 127-138.]
- [19] Yue H, Ma GW, Yang GX. Research on collaborative emergency dispatch of the excessive flood of cascade reservoirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, **50**(3): 356-363. [岳华, 马光文, 杨庚鑫. 梯级水库群超标洪水的协同应急调度研究. 水利学报, 2019, **50**(3): 356-363.]
- [20] Zhou JJ, Lin BN, Zhang R. Optimized operation scheme for deposition reduction and enhancement flood control capacity of Three Gorges Project Reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, **33**(3): 12-19. [周建军, 林秉南, 张仁. 三峡水库减淤增容调度方式研究——多汛限水位调度方案. 水利学报, 2002, **33**(3): 12-19.]
- [21] Wu HY. Formulation and application of flood regulation scheme in the Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2000, **12**(1): 19-24. DOI: 10.18307/2000.0104. [吴浩云. 太湖流域洪水调度方案的制定与实践. 湖泊科学, 2000, **12**(1): 19-24.]
- [22] 程文辉, 王船海, 朱琰. 对太湖调度线的研究. 上海: 太湖高级论坛交流文集, 2004: 100-102.
- [23] Mei Q, Zhang HH. Flood control and water resources regulation in Taihu Lake Basin: Practice and thought. *China Water Resources*, 2015, (9): 19-21, 27. [梅青, 章杭惠. 太湖流域防洪与水资源调度实践与思考. 中国水利, 2015, (9): 19-21, 27.]
- [24] 程文辉, 王船海, 朱琰. 太湖流域模型. 南京: 河海大学出版社, 2006.
- [25] 钟平安, 王建群. 水利计算. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
- [26] Lin HJ, Yang HL. Improvement of Taihu Basin hydrodynamic model. *Journal of Hydrodynamics*, 1999, **14**(3): 312-316. [林荷娟, 杨洪林. 太湖流域河网水动力学模型的改进. 水动力学研究与进展: A 辑, 1999, **14**(3): 312-316.]
- [27] Xu TY, Liu KQ, Li C *et al.* Establishment and application of large-scale flood inundation simulation model for Taihu Basin. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2021, **41**(4): 40-45. [徐天奕, 刘克强, 李琛等. 太湖流域大尺度洪涝淹没仿真模型的建立及应用. 水利水电科技进展, 2021, **41**(4): 40-45.]
- [28] 丛树铮. 水科学技术中的概率统计方法. 北京: 科学出版社, 2010.
- [29] 高俊峰, 许妍. 太湖流域生态风险评估研究. 北京: 科学出版社, 2012.
- [30] 斯洛博丹·西蒙诺维奇著. 朱瑶, 张诚译. 气候变化背景下的洪水风险管理. 北京: 清华大学出版社, 2017.
- [31] Wang LZ, Hu QF, Hu Y *et al.* Changes and cause analysis of water level characteristic factors in Taihu Lake during period from 1954 to 2013. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2016, **44**(1): 13-19. [王磊之, 胡庆芳, 胡艳等. 1954—2013年太湖水位特征要素变化及成因分析. 河海大学学报: 自然科学版, 2016, **44**(1): 13-19.]
- [32] 水利部太湖流域管理局防汛抗旱办公室. 1991年太湖流域洪水. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [33] 水利部太湖流域管理局. 2016年太湖流域洪水. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.
- [34] 朱威, 章杭惠, 甘月云等. 2020年太湖洪水调度实践与思考. 中国水利, 2021, (15): 46-48, 39.
- [35] Lu GH, Zhang JH. Present status and problems of comprehensive treatment of water environment in Taihu Lake and countermeasures. *Water Resources Protection*, 2014, **30**(2): 67-69, 94. [陆桂华, 张建华. 太湖水环境综合治理的现状、问题及对策. 水资源保护, 2014, **30**(2): 67-69, 94.]
- [36] Lin HJ, Liu M. Analytical review of hydrological design for Taihu Basin. *Journal of China Hydrology*, 2019, **39**(4): 84-89. [林荷娟, 刘敏. 太湖流域水文设计成果修订研究. 水文, 2019, **39**(4): 84-89.]
- [37] Ma Q, Liu JJ, Gao MY. Amount of pollutants discharged into Lake Taihu from Jiangsu Province, 1998-2007. *J Lake Sci*, 2010, **22**(1): 29-34. DOI: 10.18307/2010.0104. [马倩, 刘俊杰, 高明远. 江苏省入太湖污染量分析(1998—2007年). 湖泊科学, 2010, **22**(1): 29-34.]
- [38] Zhu GW, Qin BQ, Zhang YL *et al.* Fluctuation of phosphorus concentration in Lake Taihu in the past 70 years and future control strategy. *J Lake Sci*, 2021, **33**(4): 957-973. DOI: 10.18307/2021.0401. [朱广伟, 秦伯强, 张运林等. 近70年来太湖水体磷浓度变化特征及未来控制策略. 湖泊科学, 2021, **33**(4): 957-973.]
- [39] Zhu W, Hu SY, Feng GY *et al.* Effects of great floods on phosphorus in shallow lakes: A case study of Lake Taihu in 2016. *J Lake Sci*,

- 2020, **32**(2): 325-336. DOI: 10.18307/2020.0201. [朱伟, 胡思远, 冯甘雨等. 特大洪水对浅水湖泊磷的影响: 以 2016 年太湖为例. 湖泊科学, 2020, **32**(2): 325-336.]
- [40] Wu HY, Lu ZH. Review and thinking of water management practice in Taihu Basin. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, **52**(3): 277-290. [吴浩云, 陆志华. 太湖流域治水实践回顾与思考. 水利学报, 2021, **52**(3): 277-290.]
- [41] Ji HP, Wu HY, Wu J. Variation of inflow and outflow of Lake Taihu in 1986-2017. *J Lake Sci*, 2019, **31**(6): 1525-1533. DOI: 10.18307/2019.0612. [季海萍, 吴浩云, 吴娟. 1986—2017 年太湖出、入湖水量变化分析. 湖泊科学, 2019, **31**(6): 1525-1533.]
- [42] Wang XM, Zhai SH, Zhang HJ *et al.* Research on appropriate hydraulic retention time on basis of water quality improvement of Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2017, **29**(1): 9-21. DOI: 10.18307/2017.0102. [王洗民, 翟淑华, 张红举等. 基于水质改善目标的太湖适宜换水周期分析. 湖泊科学, 2017, **29**(1): 9-21.]
- [43] Shi XL, Yang JS, Chen KN *et al.* Review on the control and mitigation strategies of lake cyanobacterial blooms. *J Lake Sci*, 2022, **34**(2): 349-375. DOI: 10.18307/2022.0201. [史小丽, 杨瑾晟, 陈开宁等. 湖泊蓝藻水华防控方法综述. 湖泊科学, 2022, **34**(2): 349-375.]
- [44] Chen Y, Guan YQ, Miao JZ *et al.* Determination of the ecological water-level and assuring degree in the Lake Gaoyou, northern Jiangsu with long-term hydrological alteration. *J Lake Sci*, 2017, **29**(2): 398-408. DOI: 10.18307/2017.0216. [陈玥, 管仪庆, 苗建中等. 基于长期水文变化的苏北高邮湖生态水位及保障程度. 湖泊科学, 2017, **29**(2): 398-408.]
- [45] Liu XD, Hou ZY, Xie YH *et al.* Influence of water level on four typical submerged plants in wetlands of Lake Dongting? *J Lake Sci*, 2021, **33**(1): 181-191. DOI: 10.18307/2021.0113. [刘向东, 侯志勇, 谢永宏等. 水位对洞庭湖湿地 4 种典型沉水植物的影响. 湖泊科学, 2021, **33**(1): 181-191.]
- [46] Liu CS, Wu HY. Theoretical and practical exploration of water diversion experiment from Yangtze River to Taihu Lake. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2003, **34**(1): 4-8. [刘春生, 吴浩云. 引江济太调水试验的理论和实践探索. 水利水电技术, 2003, **34**(1): 4-8.]
- [47] 吴浩云, 林荷娟. 引江济太调水试验. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [48] Lin HJ, Gan YY, Hu Y *et al.* Flood movement in Lake Taihu basin during Typhoon Fitow influence period in 2013. *J Lake Sci*, 2015, **27**(3): 548-552. DOI: 10.18307/2015.0323. [林荷娟, 甘月云, 胡艳等. 2013 年第 23 号“菲特”台风期间太湖流域洪水运动分析. 湖泊科学, 2015, **27**(3): 548-552.]
- [49] Dong ZC, Ni XK, Chen MF *et al.* Multi-objective time-varying preference decision-making method for basin water resource dispatch and its application. *Advances in Water Science*, 2021, **32**(3): 376-386. [董增川, 倪效宽, 陈牧凤等. 流域水资源调度多目标时变偏好决策方法及应用. 水科学进展, 2021, **32**(3): 376-386.]
- [50] Wang ZZ, Liu KL, Liu YC *et al.* Optimizing the moderate size using floodwater in a large-scale shallow lake. *Advances in Water Science*, 2020, **31**(6): 908-916. [王宗志, 刘克琳, 刘友春等. 浅水湖泊洪水资源适度开发规模优选模型. 水科学进展, 2020, **31**(6): 908-916.]
- [51] Zhang C, Chen XX, Li Y *et al.* Analytical analysis for optimal operation of the recipient reservoir in inter-basin water transfer projects. *Advances in Water Science*, 2018, **29**(4): 492-504. [张弛, 陈晓贤, 李昱等. 跨区域引水受水水库最优调度决策的理论分析. 水科学进展, 2018, **29**(4): 492-504.]